

УДК 621.3.078.4+519.876.5

Анализ чувствительности системы модального управления механизмом перемещения грузовой тележки мостового крана к неточному определению параметров объекта управления

В. Н. Павлыш, Д.В. Бажутин

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

dv.bazhutin@yandex.ru

Аннотация

В работе представлен анализ устойчивости системы модального управления механизмом перемещения грузовой тележки мостового крана, синтезированной из условий демпфирования колебаний груза, при неточном определении параметров объекта регулирования. Методами компьютерного моделирования проведена оценка изменения показателей качества регулирования при отклонении измеренных значений длины подвеса и массы груза от истинных. Показано, что в пределах точности работы современных средств измерений варьируемых параметров объекта синтезированная система сохраняет устойчивость и обеспечивает приемлемое качество переходных процессов.

Введение

Возникающие при перемещении грузов мостовыми кранами колебательные движения негативно сказываются на производительности крановых установок, поскольку приводят к увеличению времени транспортировки. Для устранения этих колебаний применяют различные подходы, например, используют заранее рассчитанные диаграммы разгона [1], искусственные нейронные сети системы нечеткой логики [2], импульсное управление по методике input shaping [3], системы с отрицательной обратной связью по вектору состояния системы [4] и т.д. Последние из перечисленных систем выделяются за счет относительной простоты реализации, а также возможности непосредственного синтеза формы переходной функции. В [5, 6] рассмотрены вопросы разработки систем вертикальной стабилизации перемещаемых мостовыми кранами грузов с использованием модального управления при известных постоянных параметрах объекта управления, а в [7] приводится методика адаптации подобной системы к известному закону изменения длины подвеса.

Общей проблемой систем модального управления является чувствительность к точности определения параметров объекта управления. Следовательно, при разработке подобных систем необходимо проводить анализ влияния данного показателя на качество переходных процессов. В [8, 9] подобные исследования проводятся путем анализа изменения формы переходных функций замкнутой системы и расположения корней ее характеристического полинома на комплексной плоскости.

Целью работы является анализ влияния погрешностей определения параметров модели на форму переходных процессов в системе демпфирования колебаний груза, а также оценка необходимой точности их измерения для обеспечения удовлетворительного качества демпфирования.

Модель объекта исследований

В качестве объекта исследований примем тележку мостового крана с подвешенным грузом, схематическое изображение которой приведено на рисунке 1. На этом рисунке обозначены: M – масса тележки, m – масса груза, L – длина подвеса, φ – угол отклонения груза от вертикали, ω – угловая скорость колебаний груза, F_y – тяговое усилие электропривода тележки, v_y – линейная скорость тележки, F_z – тяговое усилие электропривода подъема груза, v_z – скорость подъема груза.

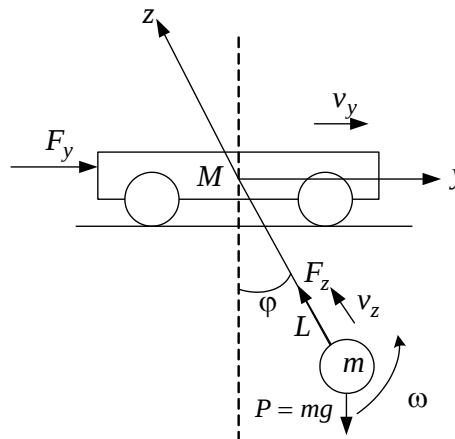


Рисунок 1 – Схематическое изображение тележки с подвешенным грузом

Математическое описание движения такой системы может быть получено с помощью уравнения Лагранжа 2-го рода в виде:

$$\begin{cases} \frac{dv_y(t)}{dt} = \frac{1}{M+m} \left[F_y(t) + mL(t) \left(\frac{d\omega(t)}{dt} \cos \varphi(t) - L(t)\omega^2(t) \sin \varphi(t) + \frac{dv_z(t)}{dt} \sin \varphi(t) + 2v_z(t)\omega(t) \cos \varphi(t) \right) \right], \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{L(t)} \left[\frac{dv_y(t)}{dt} \cos \varphi(t) + g \sin \varphi(t) + 2v_z(t)\omega(t) \right], \\ \frac{dv_z(t)}{dt} = \frac{F_z(t)}{m} + \frac{dv_y(t)}{dt} \sin \varphi(t) + L(t)\omega^2(t) + g \cos \varphi(t), \\ \frac{ds_y(t)}{dt} = v_y(t), \quad \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t), \quad \frac{dL(t)}{dt} = -v_z(t). \end{cases} \quad (1)$$

Для синтеза системы демпфирования колебаний груза необходимо линеаризовать полученные уравнения, приняв длину подвеса постоянной, а также считая значения угла отклонения груза от вертикали достаточно малыми, благодаря чему можно принять $\sin \varphi \approx \varphi$, $\cos \varphi \approx 1$, $\omega^2 \approx 0$. После необходимых преобразований получим модель объекта исследования в следующем виде:

$$\begin{cases} M \frac{dv_y(t)}{dt} = F_y(t) + mg\varphi(t), \\ \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t) \\ L(t) \frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{1}{M} F_y(t) - \frac{g(M+m)}{M} \varphi(t). \end{cases} \quad (2)$$

Синтез системы модального управления

Для синтеза системы модального управления необходимо преобразовать математическую модель объекта управления (2) в матричную форму пространства состояний. Приняв вектор состояния в виде:

$$\mathbf{X} = [v_y \quad \varphi \quad \omega]^T,$$

для входного воздействия $u = F_y$ после всех необходимых преобразований получим матрицы состояния в следующем виде:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{(M+m)g}{ML(t)} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} \\ 0 \\ -\frac{1}{ML(t)} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Для этих матриц в [7] получены формулы для коэффициентов модального регулятора, обеспечивающего эффективное демпфирование колебаний груза:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{\Omega_0^3 ML}{g} \\ g(M+m) - \Omega_0^2 \gamma_1 LM \\ \frac{-M \Omega_0 L (\gamma_2 g - \Omega_0^2 L)}{g} \end{bmatrix}^T, \quad (4)$$

где Ω_0 – среднегеометрический корень желаемого характеристического полинома замкнутой системы, а γ_1 и γ_2 – коэффициенты его нормированного вида:

$$G_*(p) = p^3 + \Omega_0 \gamma_2 p^2 + \Omega_0^2 \gamma_1 p + \Omega_0^3.$$

Структурная схема системы модального управления, синтезированной из условия обеспечения демпфирования колебаний груза в соответствии с [7], приведена на рис. 2.

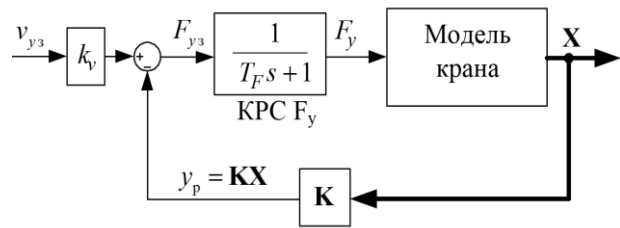


Рисунок 2 – Структурная схема исследуемой системы модального управления

В данной модели дополнительно учтено наличие и оптимизированного контура регулирования тягового усилия (КПС F_y) в виде аperiodического звена с постоянной времени $T_F = 0,002$ с.

В объекте управления содержатся три параметра:

- 1) масса тележки M , которая в процессе работы не изменяется, поэтому принимается постоянной;
- 2) масса груза m , которая в процессе работы может изменяться в широком диапазоне (от массы пустого крюка до максимальной грузоподъемности крана);
- 3) длина подвеса L , которая постоянно изменяется во время работы от максимального значения (высота установки крана) до минимально допустимого по условиям эксплуатации.

Таким образом, необходимо оценить влияние неточного определения двух параметров объекта регулирования на качество переходных процессов.

С целью упрощения вычислений проводить расчеты будем по каждому из них отдельно.

Оценка чувствительности системы к неточному определению длины подвеса

Пусть L_0 – оцениваемое значение длины подвеса, используемое при расчете коэффициентов модального регулятора. Тогда для объекта регулирования, заданного матрицами состояния (3), передаточная функция замкнутой системы модального управления с коэффициентами обратных связей по вектору состояний, полученными из (5) путем замены истинного значения длины подвеса L на оцениваемое L_0 :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{\Omega_0^3 M L_0}{g} \\ g(M+m) - \Omega_0^2 \gamma_1 L_0 M \\ -M \Omega_0 L_0 (\gamma_2 g - \Omega_0^2 L_0) \\ g \end{bmatrix}^T, \quad (5)$$

запишется в виде:

$$K(p) = \frac{v_y(p)}{F_y(p)} = \frac{\frac{L}{g} p^2 + 1}{\frac{L}{L_0 \Omega_0^3} p^3 + b_2 p^2 + \frac{\gamma_1}{\Omega_0} p + 1}, \quad (6)$$

где

$$b_2 = \frac{\gamma_2}{\Omega_0^2} + \frac{L - L_0}{g}.$$

В [7] отмечено, что быстродействие разработанной системы демпфирования колебаний необходимо адаптировать к изменению длины подвеса L путем изменения величины среднегеометрического корня Ω_0 в функции этого значения. При этом показано, что удовлетворительное качество переходных процессов можно получить, изменяя значение Ω_0 пропорционально изменению частоты собственных колебаний груза Ω_c :

$$\Omega_c = \sqrt{\frac{g}{L}}.$$

Соответственно, выраженная в метрах абсолютная погрешность измерения длины каната будет иметь различное влияние на качество переходных процессов в разработанной системе. В связи с этим возникает необходимость проведения исследований при нескольких значениях оцениваемой длины подвеса L_0 и сравнения полученных результатов.

В рамках данного исследования ограничимся тремя значениями данного параметра: 5 м, 12 м и 20 м. В качестве критерия анализа будем использовать величину перерегулирования и длительности переходного процесса. Выбор этих показателей обусловлен наличием ограничения максимального значения

линейной скорости тележки и общими требованиями к быстродействию систем автоматического управления.

Все исследования будем проводить методами компьютерного моделирования, используя структурную схему, показанную на рисунке 2.

При моделировании приняты следующие значения параметров модели: $M = 2000$ кг, $m = 4000$ кг. В качестве желаемого характеристического полинома использован полином Бесселя.

На рисунке 3 приведены семейства переходных функций замкнутой системы при изменении длины подвеса в диапазоне $\pm 40\%$ от настроенного значения.

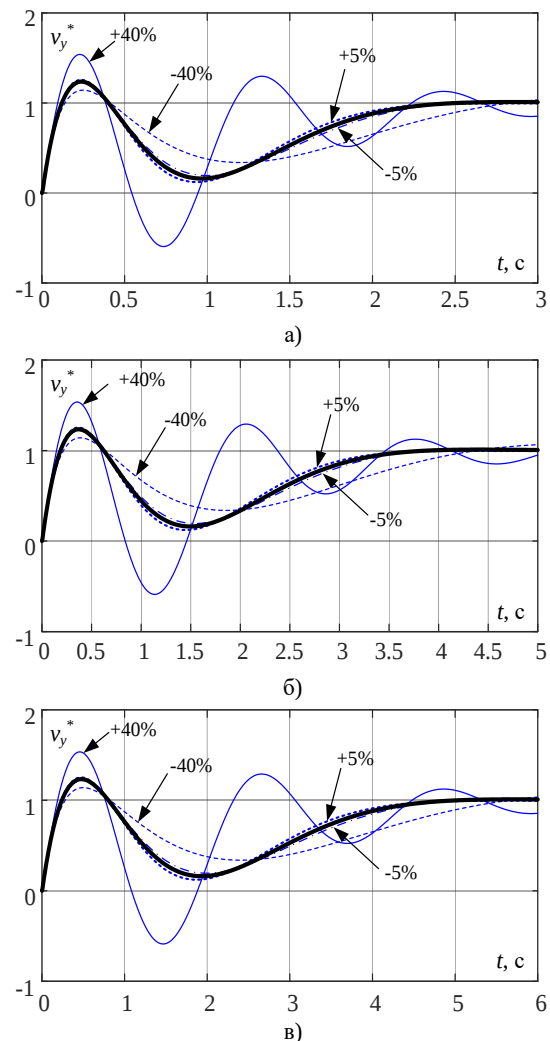


Рисунок 3 – Семейство переходных характеристик исследуемой системы при отклонении длины подвеса от настроенного значения: а) $L_0 = 5$ м; б) $L_0 = 12$ м; в) $L_0 = 20$ м

Анализ изменения указанных параметров для всех рассматриваемых случаев приведен в табл.1. Соответствующие диаграммы приведены на рис.4.

Таблица 1 – Показатели качества переходных процессов при неточном определении длины подвеса

Длина подвеса	L_0 , м	5	12	20
Опорные значения	σ , %	23	23	23
	$t_{пп}$, с	2,45	3,62	4,42
Худшие значения	σ , %	54	54	54
	Ухудшение, %	135	135	135
	$t_{пп}$, с	4,24	6,58	8,45
	Ухудшение, %	73	82	92

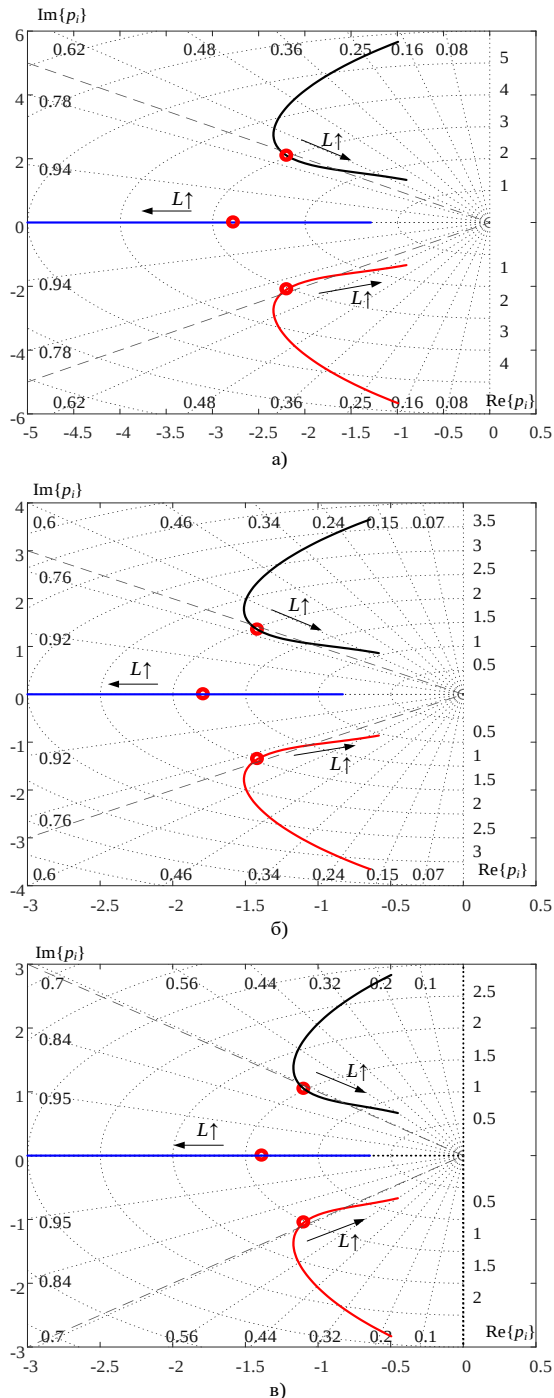


Рисунок 4 – Изменение положения корней характеристического полинома замкнутой системы при изменении длины подвеса:
а) $L_0=5$ м; б) $L_0=12$ м; в) $L_0=20$ м

Все временные диаграммы построены в долях заданного значения скорости.

Во всех трех случаях наблюдается существенное повышение колебательности и перерегулирования при $L < L_0$ и значительное увеличение длительности переходных процессов при $L > L_0$, при чем с увеличением оцениваемого значения длины подвеса L_0 степень ухудшения показателей качества переходных процессов увеличивается.

Для оценки устойчивости исследуемой системы проанализируем изменение расположения корней ее характеристического полинома при неточном определении длины подвеса. На этих графика дополнительно выделена точка, в которой выполняется условие $L = L_0$. Также нанесены линии, соответствующие оптимальному режиму затухания колебаний.

Анализ полученных диаграмм показал, что при $L > L_0$ несмотря на уменьшение перерегулирование запас устойчивости системы снижается, т.к. два комплексно-сопряженных корня смещаются в направлении границы зоны устойчивой работы.

Таким образом можно сделать вывод, что погрешность определения подвеса $\pm 40\%$ приводит к ухудшению качества переходных процессов в разработанной системе модального управления, однако эта система остается устойчивой. С учетом точности современных методов определения длины подвеса $\pm 5\%$ [10], можно сделать вывод, что система сохраняет удовлетворительное качество переходных процессов при неточном определении длины подвеса.

Оценка чувствительности системы к неточному определению массы груза

Для оценки чувствительности исследуемой системы к неточному определению массы груза воспользуемся аналогичной методикой. Введем в формулы (3) ожидаемое значение массы груза m_0 , выведем соответствующие выражения для расчета коэффициентов модального регулятора:

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\Omega_0^3 ML}{g} \\ g(M + m_0) - \Omega_0^2 \gamma_1 LM \\ \frac{-M\Omega_0 L(\gamma_2 g - \Omega_0^2 L)}{g} \end{bmatrix}^T, \quad (7)$$

в результате чего получим передаточную функцию замкнутой системы в виде:

$$K(p) = \frac{v_y(p)}{F_y(p)} = \frac{\frac{L}{g} p^2 + 1}{\frac{1}{\Omega_0^3} p^3 + \frac{\gamma_2}{\Omega_0^2} p^2 + b_1 p + 1}, \quad (8)$$

где

$$b_1 = \frac{\gamma_1}{\Omega_0} + \frac{g(m - m_0)}{LM\Omega_0^3}.$$

Влияние погрешности определения длины подвеса на форму переходных процессов будем определять методами компьютерного моделирования.

Оценку чувствительности будем проводить по двум предельным случаям:

1) система настроена на перемещение пустого крюка, а перемещается максимальная масса груза;

2) система настроена на перемещение максимальной массы груза, а перемещается пустой крюк.

Результаты моделирования при массе груза $m_{\max} = 5000$ кг и массе крюка $m_k = 150$ кг приведены на рис. 5. Данные параметры взяты для мостового крана грузоподъемностью 5 т.

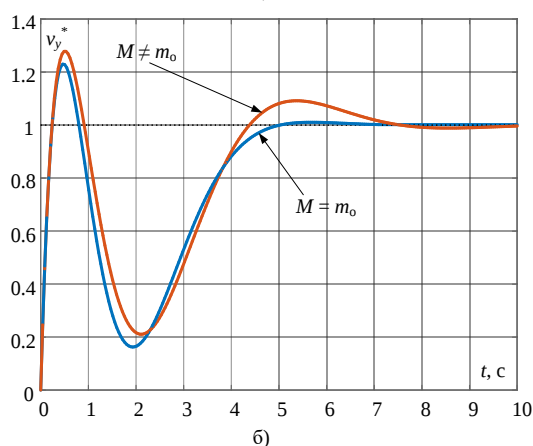
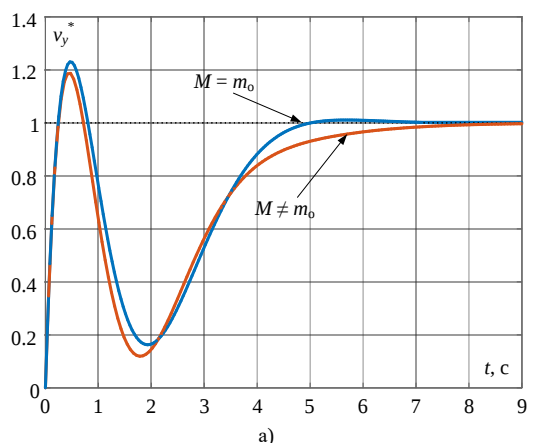


Рисунок 5 – Переходные процессы в исследуемой системе при неточном определении массы груза:

а) $m_0 = m_{\max}$; б) $m_0 = m_k$

В случае перемещения пустого крюка наблюдается уменьшение перегуливания с 23% до 19%, время переходных процессов увеличивается с 4.68 с до 6.71 с, а при перемещении полной массы груза – увеличение

перерегулирования до 28%, а времени переходных процессов – до 7 с.

Графики приведены для длины подвеса $L=20$ м. Дополнительные исследования показали, что при других значениях этого параметра соотношение показателей качества переходных процессов изменяется незначительно. Таким образом можно сделать вывод, что исследуемая система является малочувствительной к неточному определению массы перемещаемого груза.

Выводы

Синтезированная система модального управления механизмом перемещения тележки мостового крана обеспечивает эффективное демпфирование колебательных перемещений груза, при этом сохраняя устойчивость при неточном определении параметров объекта регулирования в достаточно широком диапазоне.

Наиболее значительное влияние на качество регулирования для подобной системы оказывает неточное определение длины подвеса, при котором наблюдается существенное повышение колебательности переходных процессов и их длительности. Однако точность наиболее распространенных методов определения длины подвеса позволяет нивелировать данный недостаток, позволяя разработанной системе сохранять устойчивость и высокое качество переходных процессов. Также анализ результатов моделирования показал, что рассматриваемая система малочувствительна к неточному определению массы груза.

Следовательно, неточное определение параметров объекта регулирования не приводит к существенному ухудшению качества переходных процессов в разработанной системе демпфирования колебаний груза.

Литература

1. Buch, A. Optimale Bewegungssteuerung von schwingungsfähigen mechatronischen Systemen mit zwei Freiheitsgraden am Beispiel eines Krans mit Pendelnder Last und elastischer Mechanik // Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1999. – 250 p.
2. Trabia, M.B. Generalized design of an anti-swing fuzzy logic controller for an overhead crane with hoist / M.B. Trabia, J.M. Renno and K.A. F.Moustafa. // Journal of Vibration and Control, Vol. 14, 2008. – P. 319-346.
3. Chang, C.Y. The switching algorithm for the control of overhead crane // Neural Computing & Applications vol. 15, 2006. – P. 350-358.
4. Bartolini, G. Output-feedback control of container cranes: a comparative analysis / G. Bartolini, A. Pisano and E. Usai // Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002, vol.3. – P. 3237-3242.

5. Helma, V. Active anti-sway crane control using partial state feedback from inertial sensor / V. Helma, M. Goubey // 23rd International Conference on Process Control (PC), 2021. – P. 137-142.
6. Gaiceanu, M. Motion control of a single-beam gantry crane trolley / M. Gaiceanu, F. Stan // 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), 2010. – P. 149-152.
7. Tolochko, O. Anti-Sway Full Order State-Feedback Control of the Overhead Crane with Variable Rope Length Using Luenberger Observer / O. Tolochko, D. Bazhutin // 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 – Novocherkassk, 2018. – P. 159-163. – DOI 10.1109/ICEPDS.2018.8571596.
8. Roldan-Perez, J. Comprehensive Design and Analysis of a State-Feedback Controller for a Dynamic Voltage Restorer / J. Roldan-Perez, A. Garcia-Cerrada, A. Rodriguez-Cabero, J.L. Zamora-Macho // Energies, 11 (8), 2018. – p. 1972-1997.
9. Montagner, V.F. Design and robustness analysis of a state feedback controller applied to a bidirectional boost converter / V.F. Montagner, A.A. Ferreira // 2009 Brazilian Power Electronics Conference, 2009. – P. 385-388.
10. Raubar, E. Anti-Sway System for Ship-to-Shore Cranes / E. Raubar, D. Vrancic // Journal of Mechanical Engineering. –2012. – Vol. 58, Issue 5. – P. 338–344.

Павлыш В. Н., Бажутин Д. В. Анализ чувствительности системы модального управления механизмом перемещения грузовой тележки мостового крана к неточному определению параметров объекта управления. В работе представлен анализ устойчивости системы модального управления механизмом перемещения грузовой тележки мостового крана, синтезированной из условий демпфирования колебаний груза, при неточном определении параметров объекта регулирования. Методами компьютерного моделирования проведена оценка изменения показателей качества регулирования при отклонении измеренных значений длины подвеса и массы груза от истинных. Показано, что в пределах точности работы современных средств измерений варьируемых параметров объекта синтезированная система сохраняет устойчивость и обеспечивает приемлемое качество переходных процессов.

Ключевые слова: мостовой кран, система модального управления, ошибка определения параметров, устойчивость.

Pavlysh V., Bazhutin D. Sensitivity analysis of a state-feedback control system for a gantry crane payload hoisting trolley motion mechanism to inaccurate plant parameter estimation. The article presents the stability analysis of a state-feedback control system for a gantry crane payload hoisting trolley motion mechanism, designed to suppress payload swing, in terms of inaccurate plant parameter estimation. By means of computer simulation a control quality variation estimate under conditions of deviation of measured values of cable length and payload mass from the actual ones was carried out. It was shown, that within the modern measurement systems accuracy range for the specified varied plant parameters the designed systems maintains stability and ensures acceptable transient quality.

Keywords: gantry crane, state-feedback control, parameter estimation inaccuracy, stability.

Статья поступила в редакцию 15.02.2022
Рекомендована к публикации профессором Аноприенко А.Я.